

**Estudo empírico-analítico como forma de validação da confiabilidade de design por meio da análise de elementos finitos – estudo de caso estriado cônico.**

**Empirical-analytical study as a means of validating design reliability through finite element analysis – case study of a conical ribbed strut.**

**Estudio empírico-analítico como forma de validación de la confiabilidad del diseño mediante el análisis de elementos finitos - estudio de caso de estriado cónico.**

Leticia Yumi Asano<sup>1</sup>  
Mário Luiz Nunes da Silva<sup>2</sup>

**Resumo:** Este estudo emprega a Análise de Elementos Finitos (FEA) para validar a confiabilidade de um projeto de estriado cônico sob torque em direções automotivas. A análise foi realizada no software Creo, simulando o aumento de carga de 3.200 Nm para 3.900 Nm, com foco no torque de ruptura da peça. Os resultados da FEA foram comparados com dados experimentais obtidos por meio de um teste estático. O objetivo do estudo é demonstrar a eficácia da FEA como ferramenta de validação de projeto, garantindo segurança e eficiência em condições operacionais diversas. Os resultados mostraram boa correlação entre os dados simulados e experimentais, confirmando a utilidade da FEA na validação de componentes mecânicos.

**Palavras-chave:** Elementos Finitos. Modelagem Computacional. Estudo Empírico-Analítico. Estriado Cônico.

**Abstract:** This study uses Finite Element Analysis (FEA) to validate the reliability of a ribbed conical design under torque in automotive directions. The analysis was performed using Creo software, simulating a load increase from 3,200 Nm to 3,900 Nm, focusing on the piece's torque at failure. The FEA results were compared to experimental data obtained from a static test. The objective of the study is to demonstrate the effectiveness of FEA as a design validation tool, ensuring safety and efficiency under various operational conditions. The results showed a strong correlation between the simulated and experimental data, confirming the utility of FEA in validating mechanical components.

**Keywords:** Finite Elements. Computational Modeling. Empirical-Analytical Study. Conical Striated.

---

<sup>1</sup> Graduanda de Engenharia Mecânica. Instituto Federal de São Paulo. E-mail: [leticia.y@aluno.ifsp.edu.br](mailto:leticia.y@aluno.ifsp.edu.br)

<sup>2</sup> Pós-Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. <https://orcid.org/0000-0001-6275-5159>. E-mail: [marioluiznunes@ifsp.edu.br](mailto:marioluiznunes@ifsp.edu.br)

**Resumen:** Este estudio emplea el Análisis de Elementos Finitos (FEA) para validar la confiabilidad de un diseño de estriado cónico bajo torque en direcciones automotrices. El análisis se realizó en el software Creo, simulando el aumento de carga de 3.200 Nm a 3.900 Nm, con foco en el torque de ruptura de la pieza. Los resultados del FEA fueron comparados con datos experimentales obtenidos mediante una prueba estática. El objetivo del estudio es demostrar la eficacia del FEA como herramienta de validación de diseño, garantizando seguridad y eficiencia en condiciones operacionales diversas. Los resultados mostraron buena correlación entre los datos simulados y experimentales, confirmando la utilidad del FEA en la validación de componentes mecánicos.

**Palabras clave:** Elementos Finitos. Modelado Computacional. Estudio Empírico-Analítico. Estriado Cónico.

Submetido 15/01/2025

Aceito 10/03/2025

Publicado 02/04/2025

## Introdução

Diante da crescente demanda das exigências dos consumidores por modernidades no ramo automobilístico e a concorrência sobre quem a entrega primeiro, grandes empresas procurar caminhos para tornar-se competitivas comparadas a seus concorrentes, e nisso, a implementação de tecnologias como estrutura de se garantir no mercado com seus concorrentes é crucial. Com a citação de Slack (2002) as empresas têm aplicado suas rendas em entrega de produção de qualidades e na rapidez em desenvolver em novas funcionalidades, pois chegar à necessidade de seu consumidor antes de concorrentes é a forma de se garantir sua posição de mercado.

Na indústria automotiva, um dos principais métodos utilizados para o desenvolvimento de novos produtos é o Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP). Esse processo estabelece padrões a serem seguidos em todas as etapas do desenvolvimento, com foco na qualidade do produto. O APQP é uma ferramenta de gestão de projetos que contribui de forma significativa para o sucesso do projeto, sendo muito mais que um simples cronograma a ser seguido. Seu objetivo é garantir a qualidade em todas as fases do desenvolvimento do produto, desde a concepção até a produção final (Rocha; Salerno, 2014).

A segunda etapa do APQP, Projeto e Desenvolvimento do Produto, envolve atividades cruciais como a análise de falhas, definição do sistema de fabricação, métodos de medição, planos de amostragem e especificações de materiais (Albertin, 2018). Uma possível tecnologia utilizada nesta fase é a Análise de Elementos Finitos (FEA), que, de acordo com Kim (2011), permite a simulação tridimensional do comportamento de uma estrutura diante de tensões e deslocamentos. Essa ferramenta permite realizar verificações rápidas para identificar possíveis falhas e simular condições reais que podem ocorrer durante a vida útil do produto, incluindo materiais, esforços e fatores externos.

Na penúltima fase do APQP, que é a validação do produto e do processo, um lote piloto é fabricado para validar tanto o produto quanto o processo. Nessa etapa, são realizadas medições das peças, testes experimentais verificado a capacidade do produto e é avaliadas as propriedades principais do produto (Albertin, 2018). No entanto, a fabricação de protótipos pode envolver custos significativos, especialmente em projetos mais complexos. Esses custos englobam materiais, ferramentas, tempo de trabalho da equipe de engenharia, fabricação e testes para

validação do produto. Além disso, ajustes e revisões podem representar uma porcentagem substancial do custo total de desenvolvimento. O custo de protótipos tende a aumentar conforme a complexidade e o nível de criticidade exigidos para validar o produto.

O presente estudo utiliza um estudo de caso que analisa o aumento de torque em caixas de direção hidráulica aplicado em caminhões e ônibus, um componente crucial para a segurança e dirigibilidade de um veículo. O sistema de direção é responsável por transformar o movimento de giro do volante em movimento angular das rodas, sendo, portanto, um elemento crítico para a segurança do veículo. Para garantir uma condução segura e eficiente, o sistema de direção deve atender a normas e diretivas específicas (Bosch, 2005), o que implica a necessidade de diversas validações adicionais para assegurar sua funcionalidade e resistência.

O objetivo deste trabalho é demonstrar a importância da aplicação da Análise de Elementos Finitos (FEA) no desenvolvimento e modificação de novos produtos, com um foco particular na indústria automotiva. A pesquisa também enfatiza a importância dos protótipos na garantia de segurança e funcionalidade dos produtos. O estudo argumenta que a utilização de tecnologias de simulação, como o FEA, pode reduzir significativamente a necessidade de retrabalho em protótipos físicos, permitindo a identificação de falhas potenciais antes mesmo da fabricação de protótipos, o que resulta em economia de tempo e recursos no processo de desenvolvimento.

## Revisão da Literatura

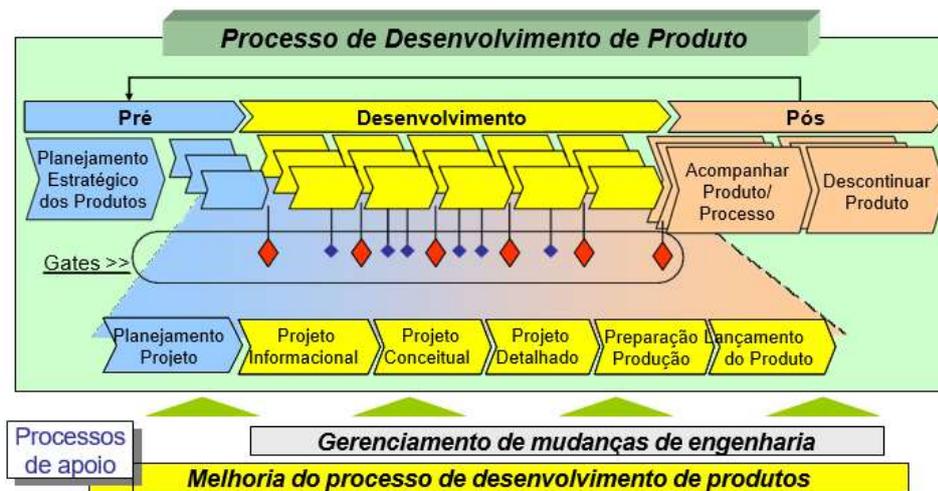
### Desenvolvimento de Produto

O processo de desenvolvimento de produto (PDP) trata-se de um processo sistemático que engloba todas as atividades necessárias desde a análise de novas oportunidades de mercado até a transformação dessas oportunidades em condições adequadas para a fabricação do produto. Esse processo é dividido em três etapas principais: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento.

Na fase de pré-desenvolvimento, realiza-se a análise do setor em que a empresa está inserida, avaliando seus produtos e identificando as novas necessidades do mercado, além das possíveis oportunidades de inovação. A fase de pós-desenvolvimento supervisiona o processo

do produto após o lançamento. Já o desenvolvimento envolve cinco etapas fundamentais: informação de projeto, conceito de projeto, detalhamento de projeto, preparação de produção e lançamento do produto (Rozenfeld et al., 2006). A figura 1 ilustra essas fases.

Figura 1 – Fases de processo do PDP.



Fonte: Rozenfeld *et al.*, 2006.

Os benefícios de seguir as etapas do PDP incluem a maior padronização dos produtos, um melhor atendimento à produtividade planejada, pois todas as áreas envolvidas no processo produtivo são integradas desde o início, e uma menor probabilidade de falhas nos produtos, uma vez que ferramentas de controle de qualidade, como a análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) de Processo e Produto, são aplicadas ao longo do desenvolvimento, segundo Clark & Fujimoto (1991).

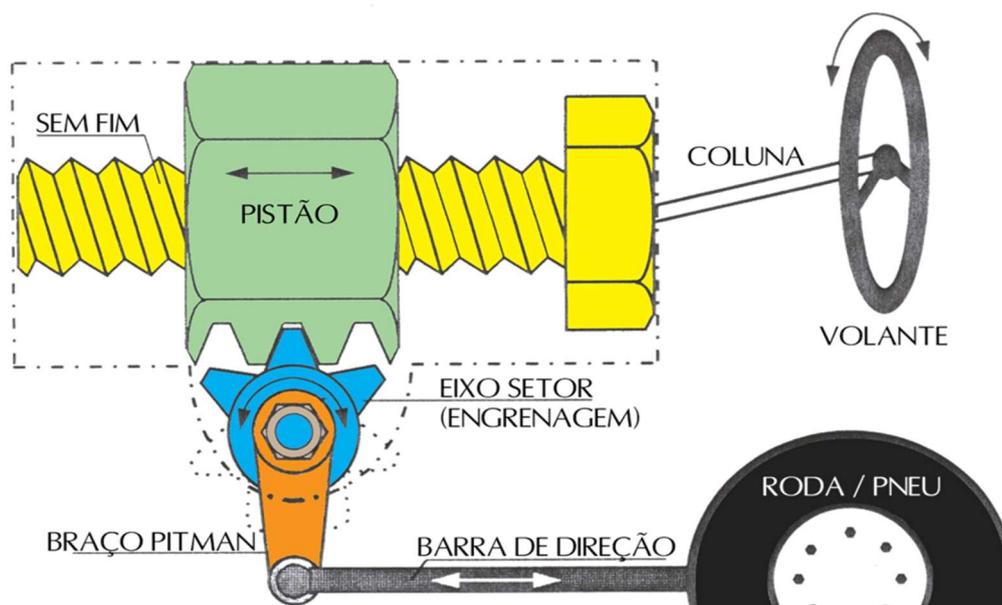
No contexto da indústria automobilística, um modelo amplamente utilizado para o desenvolvimento de novos produtos é o planejamento avançado da qualidade do produto (APQP), que estabelece os padrões a serem seguidos para garantir a qualidade durante todas as fases do desenvolvimento do produto. Pimenta (2009, p. 15) descreve o APQP como "um método estruturado para definir as ações necessárias para um PDP, a fim de assegurar que um produto satisfaça o cliente". Para que o desenvolvimento seja bem-sucedido, é essencial que a sequência de operações seja mantida conforme o planejado.

### Torque na Caixa de Direção

O torque entra no sistema de caixa de direção automotiva pelo volante, que é rotacionado pelo motorista. O motorista exerce a força para mover o volante, causando a produção de torque que é transferido para a coluna de direção. A coluna de direção, por sua vez, está conectada à caixa de direção e normalmente opera com mecanismos que convertem o torque rotacional em movimento linear. Esse processo é facilitado pelo acionamento do fluido hidráulico, que, ao ser pressurizado nas extremidades do pistão, interage com o eixo sem fim, que, em conjunto, ajusta a direção de acordo com a vontade do motorista, para a esquerda ou para direita.

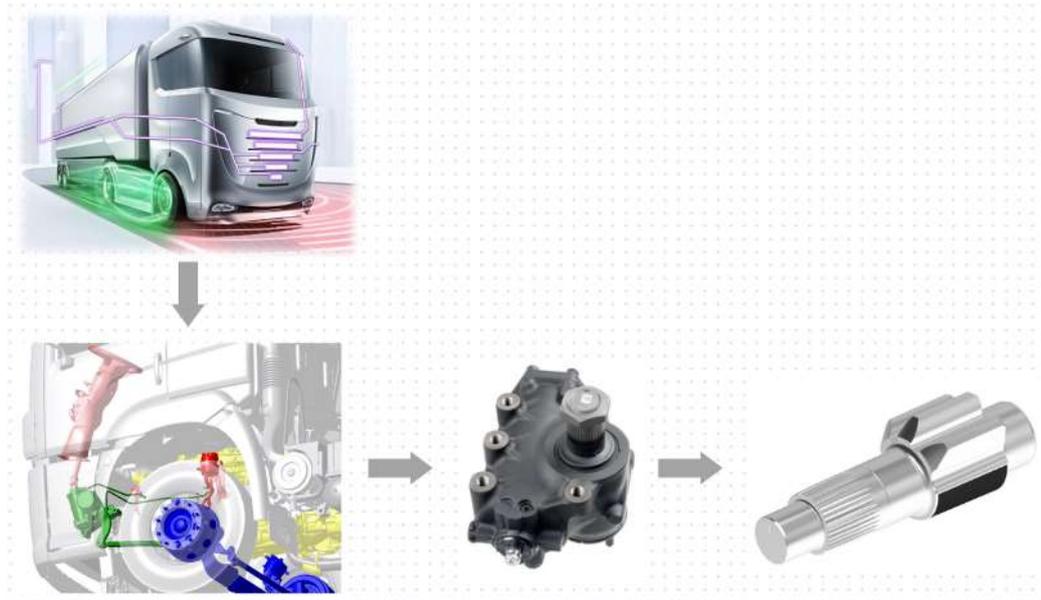
O torque gerado é então transferido para o eixo setor, que está conectado ao pistão por meio de dentes de engrenagem. Quando o eixo setor entra em contato com o braço Pitman por meio do engrenamento estriado, o torque passa do Pitman para a barra de direção. A barra de direção, conectada às rodas dianteiras, atua como intermediária na transmissão do torque da caixa de direção para as rodas. Quando o torque é adequadamente transferido, o veículo se move conforme as intenções do motorista (Bosch, 2005). Componentes representados na figura 2 e visão do sistema figura 3.

Figura 2 - Representação da transferência de torque na caixa de direção.



Fonte: Cortesia Bosch.

Figura 3 – Representação do sistema de estudo.



Fonte: Adaptado Bosch.

### Dimensionamento de eixo

O projeto e dimensões do eixo setor podem variar de acordo com o tipo de veículo, o uso e os requisitos específicos do projeto, para isso é necessário levantar as expectativas do cliente para o projeto.

Conforme argumentado em Childs (2021), os eixos possuem diversas combinações de cargas, incluindo cargas axiais, de flexão e torcionais. Essas cargas podem ser variáveis e flutuantes ao longo do tempo. Portanto torna-se necessária a verificação de alguns critérios para o seu dimensionamento, representados na tabela 1.

Tabela 1 – Considerações para o dimensionamento de eixos.

Considerações	Observações
Tamanho e espaçamento dos componentes	Sendo necessário a verificação do desenho de montagem geral para o seu posicionamento.
Tolerâncias	Estudo de tolerâncias de fabricação para que não ocorra interferências em seu funcionamento.

Seleção de materiais	Estudo para tratamento térmico e resistência do material.
Deflexão e rigidez	Estudo sobre: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deflexão por flexão</li> <li>- Deflexão torcional</li> <li>- Inclinação em rolamentos</li> <li>- Deflexão de cisalhamento</li> </ul>
Estresse e força	Estudo sobre: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Força estática</li> <li>- Fadiga</li> </ul>
Vida útil	Utilização de testes experimentais e/ou simulação em programas.
Considerações sobre a produção	Deve se planejar a melhor maneira para a fabricação em grande escala.

Fonte: Adaptado de Childs PRN, 2021.

### Métodos de engrenagem em eixo

Os eixos têm como principal função transmitir torque e movimento de rotação entre componentes, em mercado temos uma variedade de tipos, dentre elas as engrenagens cilíndricas de dentes retos, cilíndricas de dentes helicoidais, cônicas, engrenagens de dentes internos e engrenagens estriadas (SENAI, s.d.). As engrenagens estriadas serão o foco de estudo no presente trabalho.

As engrenagens estriadas, possuem dentes retos cortados perpendicularmente à superfície de rotação, tendo como função transmitir torque e movimento entre eixos paralelos. O movimento rotacional é transferido de uma engrenagem para a outra quando duas engrenagens estriadas se combinam. Nos estriados cônicos, a maior tensão ocorre na região de transição entre o estriado e a base do cone (Peng, 2021).

O número de dentes, o módulo *pitch*, o ângulo de pressão, o perfil dos dentes e outras considerações geométricas são todos envolvidos no projeto de engrenagens estriadas. Para garantir um bom engrenamento, resistência mecânica e vida útil prolongada, é necessário

verificar normas de estriado (SENAI, s.d.). A figura 4 representa o estriado cônico presente no eixo setor.

Figura 4 – Imagem 3D do estriado.



Fonte: Autoria Própria.

### **Método dos elementos finitos**

Uma das tecnologias utilizadas na engenharia é chamada de FEA que, segundo Kim (2011), é uma maneira de descobrir como uma estrutura específica reage a tensões e deslocamentos, através de um modelamento tri-dimensional.

O funcionamento é realizado a partir da divisão da sua estrutura em malhas e cada conjunto dessas malhas é composto de um nó, possuindo propriedades particulares, como propriedades do material e propriedades geométricas, no geral formando a malha (Kim, 2011).

Os métodos matemáticos e físicos são usados para simular o comportamento da estrutura e calcular os deslocamentos e tensões que resultam dessa malha. O sistema de equações é resolvido partindo de uma série de funções polinomiais simples para cada conjunto da malha, levando em consideração fixações, restrições e forças aplicadas, resultando em um resultado exato (Kim, 2011).

Conforme pontuado por Filho (2008), cada programa pode ter seus próprios algoritmos e opções de geração de malha. Porém, se torna imprescindível testar e verificar se cada método de geração de malha funciona para os requisitos do projeto.

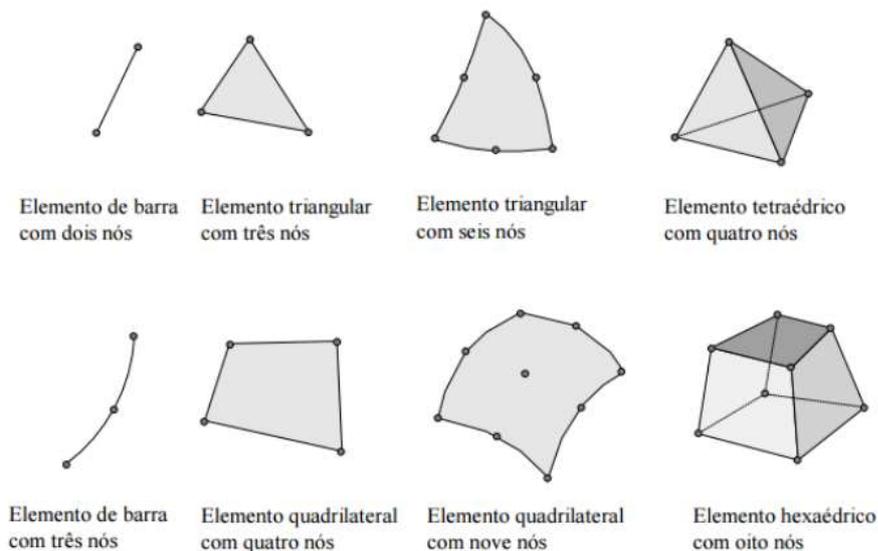
### Formato de malhas

Há uma variedade de possíveis formatos disponíveis para uso na geração de malha para o método dos elementos finitos, entre eles os mais comuns são os formatos triangular, tetraédrico, quadrilátero e hexaédrico. Cada formato tem seus próprios padrões, métodos e características (Gil, 2015).

Esses formatos pertencem a dois grupos diferentes. Os formatos triangulares e tetraédricos estão localizados no primeiro grupo, que são formas utilizadas para representar geometrias mais complexas. Em análises de duas dimensões o formato triangular é comumente aplicado, enquanto em análises de três dimensões o formato tetraédrico, que é voltado para geração de malhas em áreas com geometrias irregulares ou muitas curvas acentuadas (Owen, 1998). O formato quadrilátero é comum na análise de duas dimensões, especialmente para estruturas sujeitas em formas retangulares, e o hexaedro em três dimensões, que permite a representação volumétrica de elementos com formatos regulares como cubos e prismas retangulares, segundo Owen (1998).

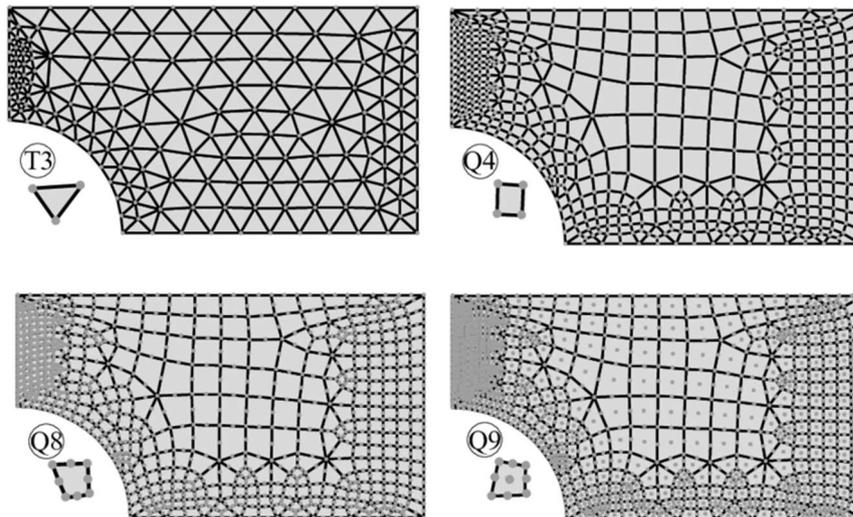
Como exemplo desses formatos, a figura 5 de Souza (2003) e figura 6, mostram como são esses elementos.

Figura 5 – Tipos de Elementos.



Fonte: Souza, 2003.

Figura 6 – Malhas de elementos finitos.



Fonte: Neves, 2021.

### Teste experimental e análise de falhas

A construção de um protótipo é a etapa crucial que envolve a validação final do projeto. Dessa forma, o protótipo é crítico, pois avalia e valida a confiabilidade do projeto, viabilidade econômica, maior facilidade ou dificuldade operacional futura e necessidade de ajustes premeditada antes da produção em larga escala (Budynas, 2011).

Falhas podem ocorrer devido a sobrecargas, deformações geométricas, falhas estruturais ou perda de desempenho, independentemente da causa (Budynas, 2011). Por meio dos testes experimentais, é possível identificar as origens dessas falhas e entender as variáveis que as influenciam, como temperatura, taxa de carregamento e composição do material. A simulação virtual é uma ferramenta útil para validar os componentes sem a necessidade de protótipos físicos, o que pode evitar custos com amostras e falhas durante a fabricação.

A resistência à tração máxima, ou limite de resistência do material, é uma propriedade fundamental para a análise de falhas, pois indica a carga máxima que um material pode suportar antes de se romper. O ensaio de tração gera o gráfico de tensão-deformação, que fornece informações cruciais sobre o comportamento do material, como o limite de escoamento, onde o material começa a se deformar plasticamente (Dalcin, 2007). O ponto de ruptura, onde o

material se rompe completamente, também é identificado nesse gráfico, sendo crucial para avaliar a capacidade do material de resistir a cargas extremas (Dalcin, 2007).

### Metodologia

Conforme Soriano (2003, p.1), a análise do comportamento de sistemas físicos requer a utilização de modelos matemáticos, bem como de modelos físicos, que geralmente são reduzidos em escala e utilizados em laboratórios.

Para este estudo, será empregado no programa Creo Parametric a criação do modelo 3D do estriado cônico e a análise de elementos finitos, a fim de comparar os resultados com o teste experimental estático realizado pela empresa Robert Bosch Direção Automotiva Ltda, de modo a verificar a compatibilidade dos testes como forma de validação de designs. Figura 7.

Figura 7 – Etapas metodológicas.



Fonte: Autoria Própria.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, o modelamento do eixo setor para o estudo foi conduzido com base no design pré-existente em direções hidráulicas automotivas de caminhões e ônibus. O propósito deste estudo foi investigar a viabilidade do estriado cônico de especificação 1' 5/8" x 36, aplicado no eixo setor e avaliar sua capacidade para suportar um esforço simulado de 3.900Nm, sendo o valor do torque exigência do cliente.

### **Modelagem em elementos finitos**

Após obter o modelo estrutural no programa CAD em 3D, o próximo passo consiste em executar uma simulação computacional para avaliar a integridade da peça. No entanto, antes de realizar a simulação, é fundamental estabelecer previamente os seguintes aspectos:

**Material dos elementos:** Importar as propriedades do material utilizado na construção da peça.

**Condições de contorno:** Definir as condições físicas e espaciais às quais a estrutura será submetida durante a simulação.

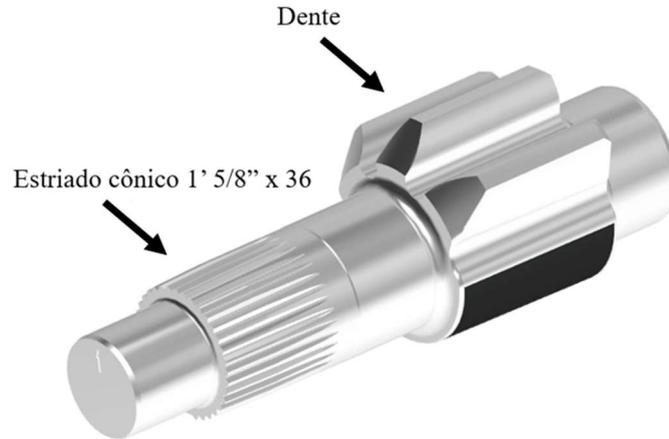
**Método de geração da malha:** Escolher o método de geração da malha adequado para determinada aplicação.

### **Geometria Estudada**

O projeto do eixo setor aplicado às direções hidráulicas é fundamental para a operação segura e eficiente dos sistemas automotivos, para isso a geometria do eixo setor é calculada com precisão para minimizar folgas e imprecisões que podem prejudicar a performance do sistema. A precisão, qualidade de fabricação, rugosidade superficial e tolerância são enfatizadas em desenhos 2D. Esses aspectos são fundamentais para assegurar não apenas a funcionalidade, mas também a durabilidade e a segurança do sistema de direção hidráulica.

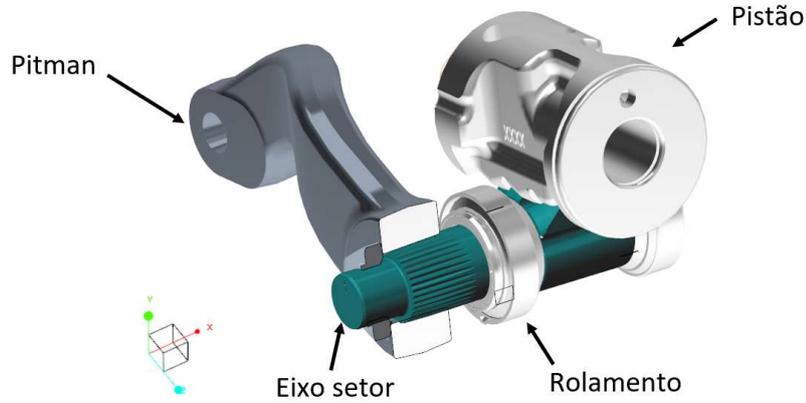
Este componente é projetado para atender aos requisitos do engrenamento com o pistão em forma de dente, e alojamento com rolamentos em suas extremidades. Sendo sua fixação por meio de estrias, que são as interfaces que transmitem os movimentos ao braço Pitman. A configuração do eixo é detalhada nas figuras 8, 9, 10, 11 e 12, com os componentes estruturais essenciais destacados.

Figura 8 – Representação das especificações presentes no Eixo Setor.



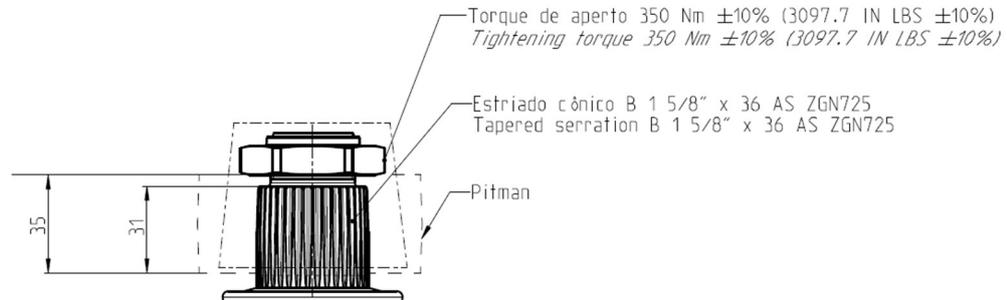
Fonte: Adaptado Bosch.

Figura 9 – Componentes em contato com o eixo setor.



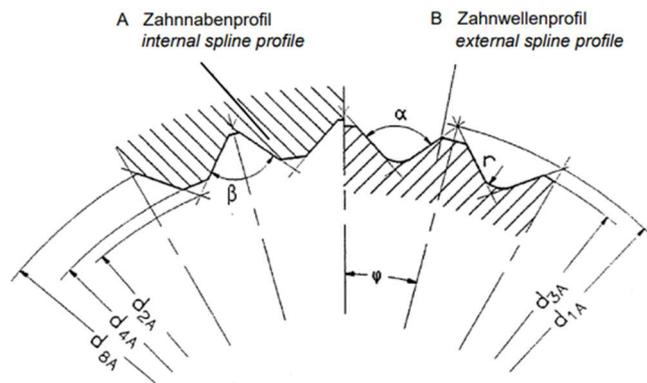
Fonte: Adaptado Bosch.

Figura 10 – Desenho 2D eixo setor com foco no estriado conico.



Fonte: Autorial Bosch.

Figura 11 – Norma AS ZGN 725 - Bosch.



Fonte: Autorial Bosch.

Figura 12 – Norma AS ZGN 725 - Bosch.

Tabelle 1:  
Alle Maße in mm soweit nichts anderes angegeben ist.

Table 1:  
All dimensions in mm unless specified otherwise.

Nenndurchmesser x Zähnezahl Nominal diameter x number of teeth	d <sub>1A</sub>	d <sub>2A</sub>	d <sub>3A</sub>	d <sub>4A</sub>	d <sub>5A</sub>	r	α	β	φ
7/8" x 36	22,25	20,23	21,83	20,58	21,95	0,25	90°	80°00'	10°00'
1" x 36	26,00	23,63	25,52	24,03	25,64	0,28			
1 1/8" x 36	28,97	26,33	28,43	26,78	28,55	0,32			
1 1/4" x 36	32,51	29,56	31,92	30,06	32,06	0,35			
1 3/8" x 36	35,46	32,23	34,80	32,78	34,98	0,39			
1 1/2" x 36	38,31	34,82	37,59	35,42	37,77	0,42			
1 5/8" x 36	41,36	37,60	40,51	38,25	40,75	0,46			
1 3/4" x 36	44,66	40,60	43,75	41,30	43,99	0,50			
2" x 48	51,19	47,73	50,57	48,28	50,74	0,39			
2 1/8" x 48	54,52	50,84	53,84	51,44	54,02	0,42	82°30'	7°30'	
2 9/16" x 48	65,75	61,31	64,49	62,40	64,83	0,77			

Fonte: Autorial Bosch.

### Propriedades do material

Além das especificações de fabricação presentes no desenho técnico, se faz importante a escolha adequada do material de fabricação para garantir que o eixo setor seja seguro, duradouro e funcional. Para este estudo, o material usado no eixo setor é o material 20MnCr5. As propriedades mecânicas e a composição química do material são apresentadas nas tabelas 2 e 3. A figura 13 também mostra informações pertinentes no desenho 2D, incluindo o tratamento térmico aplicado e a especificação da dureza do material.

Tabela 2 – Propriedade do material.

20MnCr5	
Densidade	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Young's	200 GPa
Poisson	0,3
Dureza superficial	59 HRC
Limite de resistência do material	2264 MPa
Resistência à tração de escoamento	1811 MPa

Fonte: Adaptado da norma ZF7B, autoria Bosch.

Tabela 3 – Composição Química.

20MnCr5					
C	=	0,14 - 0,19	Cu	≤	0,3
Si	≤	0,3	Al	=	0,02 - 0,05
Mn	=	1,20 - 1,50	N	≥	0,009
P	≤	0,025	Sn	≤	0,03
S	=	0,01	Ti	≤	0,005
Cr	=	1,10 - 1,40	Ca	≤	0,003
Ni	≤	0,3	Sb	≤	0,005
B	=	0,001 - 0,003	O	≤	0,0025

Fonte: Adaptado da norma ZF7B, autoria Bosch.

Figura 13 – Legenda do desenho do eixo setor.

Material / Material	ZF7B ← (S   5)	Condições de fornecimento Delivery conditions	
Forma inicial Basic form		AS ZF 7B	
Tratamento de superficial Surface treatment			
Térmico de superficial Heat treatment	Cementado e Temperado Conf. AS ZFN 417 Case hardened Acc. to AS ZFN 417		
Dureza de superficial Surface hardness	59 - 63 HRC ← (S   5)		(P)
Têmpera Case hardening depth	1.0 - 1.3 ← (S   5)	mm	(P2)
Profundidade da têmpera Hardness depth		mm	
Resistência Strength	Ver nota / See note	MPa	
Dureza de núcleo Core hardness		HBW	(P)
Resistência de beneficiamento Tempering strength		MPa	

AS ZFN 93

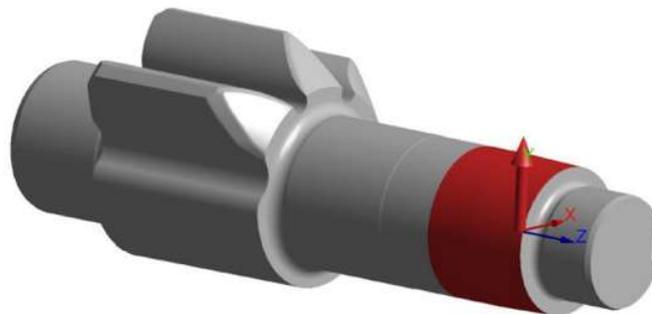
Fonte: Adaptado Bosch.

### Condições de contorno

O estudo de elementos finitos é a segunda etapa da análise do projeto. Para a simulação, o objetivo é o estudo do aumento do torque de 3200 Nm para 3900 Nm; como pode se ver na figura 14 e 15, uma força de 55140N é aplicada no eixo Y, responsável por gerar o torque de 11800Nm no eixo Z. Isso é equivalente ao torque aplicado pelo braço de Pitman. Valores baseados no valor mínimo encontrado no teste experimental.

Figura 14 – Aplicação da força de 55140N.

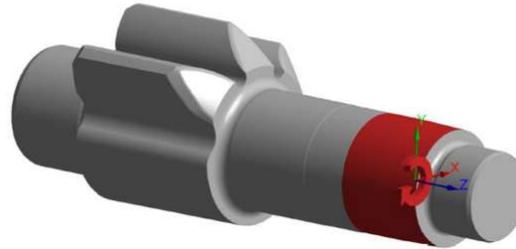
■ Força: 55140N



Fonte: Autoria Própria.

Figura 15 – Aplicação do momento de 11800Nm.

■ Momento: 11800Nm



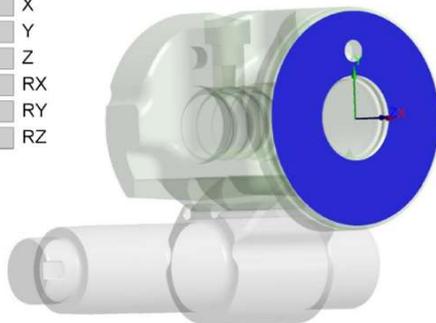
Fonte: Autoria Própria.

Nas figuras 16 e 17 são criadas para aplicar fixações e movimentos que mostram o funcionamento real do produto. Nas faces de encosto, temos a articulação fixa do pistão e a rotação dos dois lados que estão em contato com os rolamentos, figura 14. Além do contato dos dentes entre eixo setor e pistão, figura 15.

Figura 16 – Aplicação das fixações.

■ **Articulação fixa**

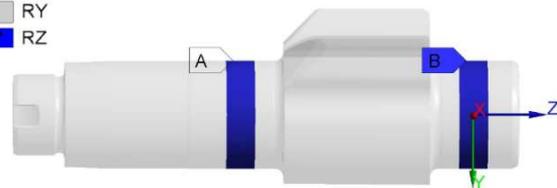
- Suporte fixo
- X
- Y
- Z
- RX
- RY
- RZ



\*Não é permitido movimento do pistão.

■ **Juntas de revolução (rolamentos)**

- Revolução do suporte
- X
- Y
- Z
- RX
- RY
- RZ



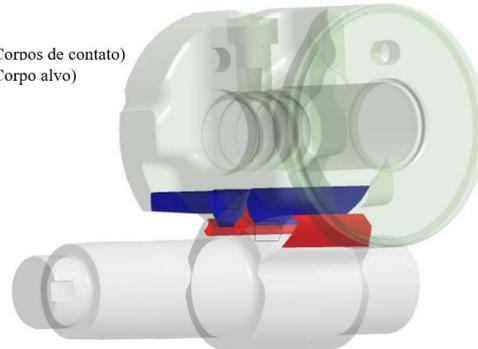
\*Rotação permitida somente no eixo z.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 – Aplicação das fixações.

▪ Conexões

- Eixo – Pistão - Sem atrito (Corpos de contato)
- Eixo – Pistão - Sem atrito (Corpo alvo)

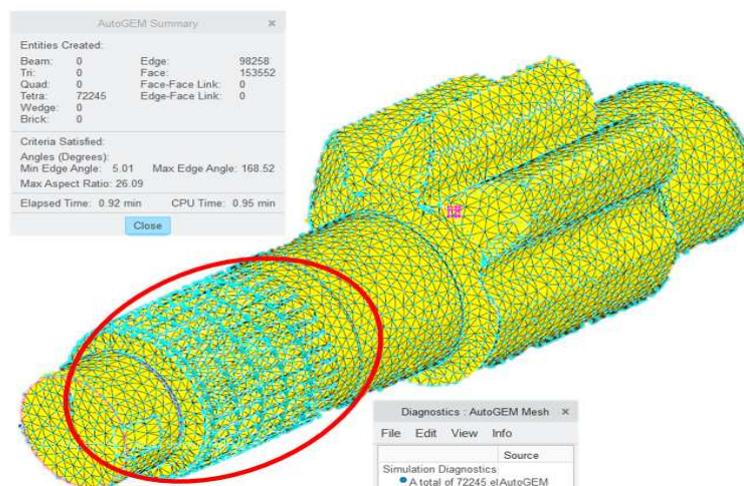


Fonte: Autoria Própria.

**Estudo de refinamento de malha**

Por fim, antes de iniciar o estudo FEA, é essencial configurar corretamente a malha de acordo com a geometria da peça. A análise revelou que elementos triangulares com três nós são necessários para representar adequadamente o estriado cônico, devido à complexidade da geometria do design e à necessidade de uma análise mais precisa e detalhada dessa região. Além disso, foi aplicado um refinamento de malha de 3 mm na área destacada do estriado, com o objetivo de reduzir o tempo de simulação e concentrar a análise nos pontos críticos, conforme ilustrado na figura 18.

Figura 18 – Geração e refinamento de malha.



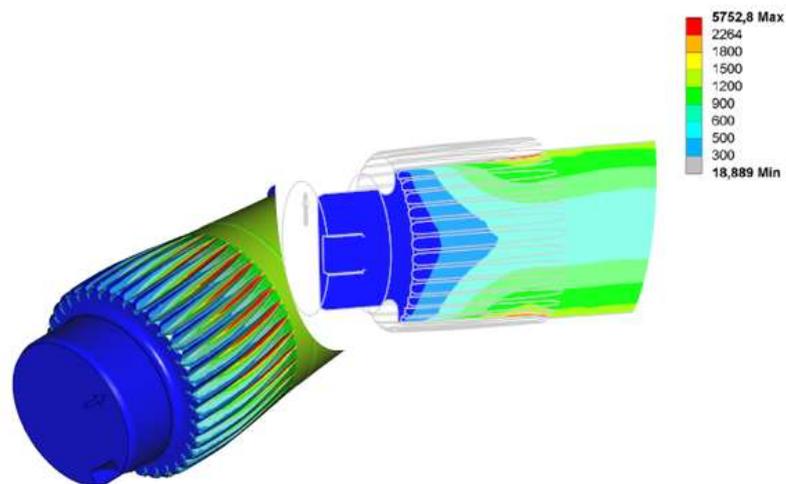
Fonte: Autoria Própria.

## Análise dos dados e Resultados

### Resultados da simulação de elementos finitos

Com a aplicação de um torque de 11.800Nm, juntamente com simulações de contorno e refinamento de malha, observou-se a formação de trincas no início do estriado, logo após o rolamento, conforme ilustrado na figura 19. Está é a área onde a tensão atinge primeiro o limite de resistência do material, de 2.264MPa. A partir da análise estrutural de Von-Mises, é possível identificar a falha iniciando na região do estriado.

Figura 19 – Representação de ruptura no estriado.



Fonte: Autoria Própria.

### Resultados do teste experimental estático

Os resultados dos testes experimentais estáticos no estriado do eixo setor mostram como o material funciona mecanicamente em condições de carga específicas até sua ruptura. Esse teste permiti avaliar a resistência à tração e a resposta do material 20MnCr5 após tratamento térmico. Os dados coletados ajudam a entender as falhas e problemas que podem surgir no início do estriado.

Norton (2010) explicou a teoria da falha, em que podemos observar uma situação real nas figuras 20, 21 e 22. Isso inclui entender como as tensões internas fazem com que as trincas

se propaguem em um ângulo específico, resultando na falha do material, na qual, devido a fratura dúctil, o material se deforma significativamente antes de se romper. Devido ao cisalhamento máximo, a propagação de trincas é relativamente lenta e pode ocorrer em ângulos próximos a 45 graus em relação à direção do torque aplicado, sendo possível observar nas figuras a seguir, após realizado três amostragens com o teste experimental por torção pela empresa Robert Bosch.

Figura 20 – Ensaio de ruptura prático – Eixo 1.



Fonte: Autorial Bosch.

Figura 21 – Ensaio de ruptura prático – Eixo 2.



Fonte: Autorial Bosch.

Figura 22 – Ensaio de ruptura prático – Eixo 3.



Fonte: Autorial Bosch.

A falha do componente ocorre durante o ensaio de ruptura quando o torque aplicado excede a capacidade de suporte do material. Como mostra na tabela 4, esse ponto de ruptura fornece dados importantes sobre a resistência final e o comportamento de falha do material. O torque mínimo encontrado nas amostras foi de 11.800 Nm. Este resultado fornece informações importantes para o projeto e análise de componentes mecânicos, destacando o limite de resistência do material antes de falhar.

Tabela 4 – Resultados obtidos no ensaio.

	FORÇA [N]	TORQUE [NM]
<b>EIXO 1</b>	47800	11950
<b>EIXO 2</b>	48300	12075
<b>EIXO 3</b>	47200	11800

Fonte: Autorial Bosch.

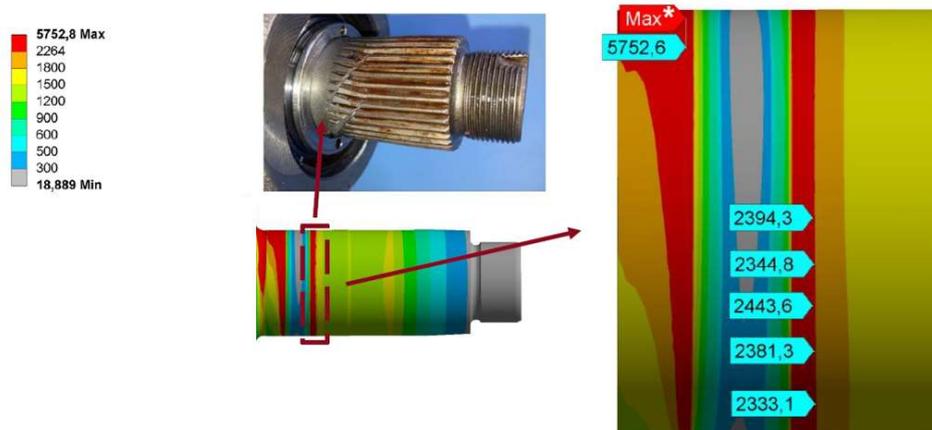
### Considerações finais

A análise dos dados e dos resultados apresentados no estudo empírico-analítico confirma a confiabilidade da comparação entre os dois testes. A aplicação da validação das peças por meio da análise de elementos finitos mostrou-se eficaz, o que permite utilizar essa metodologia para validações subsequentes em protótipos. Esse procedimento pode, assim, contribuir para a redução de custos associados a retrabalhos após a fabricação das amostras.

Os resultados obtidos indicam que o eixo, aplicado em direções automotivas para caminhões e ônibus, apresenta falha a um torque de aproximadamente 11.800 Nm, valor substancialmente superior ao torque desejado de 3.900 Nm. A falha observada é causada por flexão, gerada pelo torque do braço pitman no eixo, com a propagação da trinca ocorrendo de forma diagonal a partir do ponto de falha, devido à torção subsequente, verificar figura 23.

Considerando um fator de segurança 3, o projeto estaria de acordo, porém como as cargas cíclicas desempenham um papel crucial no comportamento de componentes sujeitos a esforços repetitivos, propõe-se a realização de um ensaio de fadiga para avaliar o desempenho do eixo sob condições de operação reais. Esse ensaio visa confirmar a adequação do material e do projeto para suportar o torque desejado de 3.900 Nm ao longo da vida útil prevista do componente, garantindo sua funcionalidade e segurança durante a operação.

Figura 23 – Análise estrutural de acordo com a tensão equivalente de Von-Mises – área de conexão.



Fonte: Autoria Própria.

## Referências

ALBERTIN, Marcos. **Planejamento avançado da qualidade: sistemas de Gestão, técnicas e ferramentas**. Rio de Janeiro: Editora Alta Books, 2018.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. São Paulo: Editora Blucher, 2005.

BUDYNAS, R. G. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8.ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER, Jr., W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**. 7.ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 2008.

Childs PRN. **Mechanical Design: Theory and Applications**. 2021.

CLARK, K. B. e FUJIMOTO, T. **Product Development Performance: strategy, organization and management in the world auto industry**. Boston: Harvard Business School Press, 1991.

CONSOLAZIO, Gary R, and CHUNG, Jae Hoon. **Vehicle impact simulation for curb and barrier design - impact simulation procedures**. Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT), vol. 1, 1 Oct. 1998.

DALCIN, Gabrieli Bortoli. **Ensaio dos Materiais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, 2007.

FERRARESI, Fernando. **Incorporação do Projeto de Embalagem na Ferramenta APQP**. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional), Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2015.

FILHO, P. J. **Reconstrução e Geração de Malhas em Estruturas Biomecânicas Tridimensionais Para Análise por Elementos Finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

GIL, Felipe De Souza Lourenço. **Análise Da Qualidade de Malha de Elementos Finitos E Validação de Situação de Caso Real de Viga Biapoiada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

GORDO, N.; FERREIRA, J. **Elementos de Máquina**, São Paulo: Escola SENAI, s.d.

KIM, N., SANKAR, B. V. **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

NORTON, Robert L. **Machine Design: An Integrated Approach**. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2010.

OWEN, S.J. **A survey of unstructured mesh generation technology.** in: Proc. 7th Internat. Meshing Roundtable, Dearborn, MI, USA, October 1998.

PENG, Austin. “**O Guia Para Iniciantes Em Eixo Estriado - DEK Manufacturing.**” Dek Make, 29 abril. 2021, [dekmake.com/pt/guia-para-eixos-estriados/](https://dekmake.com/pt/guia-para-eixos-estriados/). Acesso em: 10-07-2023.

PIMENTA, Laura Cunha Neto. **APQP: Caracterização da Aplicação da Metodologia de Gestão de Desenvolvimento de Produtos em Fornecedores dos Setores de Linha Branca e Automotivo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ROCHA, Juliana Rossi Pereira; SALERNO, Mario Sergio. O papel do APQP – Advanced Planning for Product Quality no desenvolvimento de produtos: Análise de casos na relação montadora-autopeças. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 21, n. 2, p. 231-243, 2014.

ROZENFELD, H, FORCELLINI, F.A., AMARAL, D.C, TOLEDO, J.C., SILVA, S.L., ALLIPRANDINI, D.H., SCALICE, R.K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos – Uma referência para a melhoria do processo.** São Paulo: Editora Saraiva, 2006.

SLACK, N., CHAMBERS, S., HARRINSON, C. e JOHNSTON, R. **Administração da produção.** 2.ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SORIANO, L. Humberto. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas.** São Paulo, Ed. Edusp. 2003.